

LA NOUVELLE ÈRE DE LA COSMOLOGIE

David Fossé

Le rayonnement cosmologique est mesuré de façon ultraprécise, les plus lointains objets de l'Univers sont détectés, les grandes structures cartographiées : en ce début de XXI^e siècle, nous voici entrés dans l'âge d'or de la cosmologie ! C'est du moins ce que prétendent certains astrophysiciens. D'autres, plus pessimistes, voient dans les toutes dernières observations les signes avant-coureurs d'une crise majeure... Une révolution conceptuelle est-elle en marche ?

TAMBOURS et trompettes ! En ce début de XXI^e siècle, l'âge d'or de la cosmologie est claironné partout. Qu'on y songe : des galaxies et des quasars toujours plus reculés sont découverts chaque mois — les télescopes géants du Chili ou d'Hawaï font des miracles ! —, les grands relevés se multiplient — nous connaissons de mieux en mieux les grandes structures de l'Univers —, et le satellite américain WMAP vient de produire la carte la plus précise jamais obtenue⁽¹⁾ du rayonnement cosmologique, le fameux 3 K, la plus ancienne lumière de l'Univers. Si cette floraison de résultats témoigne de la vitalité de la cosmologie observationnelle, elle cache cependant mal certains gouffres conceptuels de la cosmologie théorique. Car que nous disent les grands relevés ? La majorité de la matière est invisible et inconnue ! Quel est le message des galaxies du bout du monde ? "Nous nous sommes formées bien plus tôt que vous ne le pensiez !" De quoi témoignent les résultats de WMAP ? De l'étendue de notre ignorance... Nous pouvons, apparemment, décrire l'Univers, mais nous ne le comprenons pas. Pour Alain Riazuelo, astrophysicien au service de physique théorique du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), « *il semble que l'ivresse de la précision des mesures ait pris le pas, ces dernières années, sur la compréhension profonde des phénomènes* ».

La plus vieille lueur du monde raconte le passé

Le cas du rayonnement cosmologique est exemplaire. Appelé aussi fond diffus car il baigne tout l'Univers, ce rayonnement micro-onde a été découvert en 1965 par les chercheurs américains Arno Penzias et Robert Wilson. Il correspond à celui d'un corps dont la température n'est que de 2,73 °C (ou K) au-dessus du zéro absolu (-273,16 °C) et témoigne d'un lointain passé — 370 000 ans seulement après le big bang — où la lumière du cosmos s'est enfin libérée de la matière. C'est la plus vieille lueur du monde. Les astrophysiciens ont très vite compris le parti qu'ils pouvaient en tirer : comme tout fossile, elle pouvait les renseigner sur le passé ! A condition de savoir la faire parler... Ce qu'ils ont fait : en 1992, le satellite Cobe⁽²⁾ produit les premières cartes révélant des petits grumeaux dans le rayonnement cosmologique. De ces fluctuations de quelques millièmes de degrés seulement, les astrophysiciens tirent quantité d'informations. Sur "l'avant" — les 370 000 premières années de l'Univers — comme sur "l'après" — les quelques dizaines de millions d'années qui ont suivi l'émission du rayonnement cosmologique. « *Nous travaillons un peu comme en héliosismologie, explique Alain Riazuelo. De la même manière que nous sommes capables de déduire la structure interne du Soleil, pourtant invisible, à partir de ses oscillations de surface, nous essayons de comprendre ce qui s'est passé avant (ou derrière...) l'émission du fond diffus en étudiant ses fluctuations de température, interprétées comme des fluctuations de densité de l'Univers primordial. Le problème est que l'on ne voit pas ce fond osciller, nous n'avons qu'un instantané !* »





La petite cuisine des cosmologistes

L'extraordinaire précision des résultats de WMAP peut fasciner... ou laisser perplexe. Comment les cosmologistes peuvent-ils prétendre mesurer des variations de quelques milliardièmes dans un rayonnement émis il y a plus de 13 milliards d'années, au fin fond de l'Univers observable ? Cette lumière primordiale n'est-elle pas contaminée par toutes les galaxies, toutes les étoiles, tous les nuages de gaz qui s'intercalent entre elle et nous ? Bien sûr, elle l'est : toute une "cuisine" est nécessaire pour extraire la carte du rayonnement cosmologique à partir des observations de WMAP. "La carte des données brutes ne montre rien, excepté que nous sommes en mouvement par rapport au fond du ciel", explique Simon Prunet, chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris. Première étape, donc : modéliser l'effet de notre mouvement dans l'Univers et le retrancher aux observations. Puis, les choses se compliquent. Car notre galaxie émet son propre rayonnement micro-onde... C'est lui qui alors saute aux yeux ! Pour éliminer cette lumière parasite, les astrophysiciens s'appuient sur sa répartition – elle provient principalement du mince disque galactique – et sur ses propriétés spectrales : « *WMAP observe le ciel dans cinq bandes de fréquence, reprend Simon Prunet. Comme la distribution de l'énergie du rayonnement cosmologique dans ces bandes est bien connue, des écarts importants nous permettent de détecter les contaminants.* » Les contaminants ? Ce sont essentiellement les radiations dues aux électrons (lorsqu'ils interagissent avec des ions ou lorsqu'ils sont accélérés par un champ magnétique) et aux poussières interstellaires. « *Pour s'en affranchir, on utilise un modèle d'émission galactique que l'on retranche aux données.* » Reste alors une carte du fond diffus cosmologique... plus quelques sources ponctuelles extragalactiques ! L'équipe de WMAP en a recensé un peu plus de 200, toutes déjà observées par d'autres instruments. La magnifique carte qu'ils obtiennent, une fois ces objets identifiés, est finalement celle du rayonnement cosmologique. Mais les astrophysiciens n'en utilisent qu'un peu moins de 80% pour calculer leurs paramètres cosmologiques : une large bande centrale, dont le traitement est jugé trop peu sûr, est mise de côté... excepté pour la photo !

après l'expansion actuelle, il finirait par se contracter. Il est constitué à 70% d'une mystérieuse énergie noire. Et à 26% de matière... noire. Trop de noir dans tout cela ? Effectivement, c'est bien notre ignorance qui est mise en lumière par les observations récentes : toutes les étoiles et toutes les galaxies que les astronomes voient avec leurs si puissants télescopes ne comptent que pour 4 % de l'Univers ! Le reste, rien de moins que 96 %, nous est inconnu...

L'autre surprise de WMAP

C'est un je-ne-sais-quoi presque indiscernable, pas même un indice, trois fois rien mais... sait-on jamais : WMAP aurait-il levé un lièvre ? Selon ses données, à grande dimension, le fond diffus cosmologique est moins grumeleux que prévu. Une surprise ! "Cobe, en son temps, avait déjà suggéré un déficit de fluctuations aux grandes échelles. Sans que l'on y prête vraiment attention, se souvient Alain Riazuelo, du service de physique théorique du CEA. Depuis la publication des données de WMAP, en revanche, quatre interprétations différentes ont déjà été avancées pour l'expliquer. » L'une d'elles consiste à dire que si le rayonnement cosmologique présente moins de fluctuations que prévu aux grandes échelles, c'est tout simplement parce que l'Univers est... fini ! De la même manière qu'un tambour ne peut pas vibrer en deçà d'une certaine fréquence, qui dépend de sa taille, un Univers fini serait incapable de produire des oscillations trop larges. Cette interprétation iconoclaste, étudiée en détail par une équipe française, pourrait séduire plus d'un théoricien. Cependant, pour Simon Prunet, la méfiance est de rigueur. WMAP observe-t-il réellement un déficit aux grandes échelles ? « *Statistiquement, ce résultat n'est pas significatif, explique le chercheur de l'IAP. Nous avons trop peu d'échantillons pour cela. Et c'est bien normal : plus les structures recherchées sur le ciel sont grandes, moins on en compte.* » Car la voûte céleste, elle, est bien finie ! Malgré tout « *il faut être attentif* », souligne Alain Riazuelo. Et ne pas se priver d'explorer toutes les pistes...

D'où quelques hypothèses inévitables, notamment sur l'amplitude initiale de ces tout premiers creux et bosses. « *Parmi tous ces modèles d'Univers, l'un d'eux est généralement préféré car il fonctionne bien avec peu de paramètres* », reprend le chercheur. C'est la détermination précise de ces paramètres cosmologiques, à partir de la distribution en taille des fameux grumeaux qui a motivé la plupart des expériences de cosmologie de ces dix dernières années⁽³⁾. Jusqu'à WMAP.

WMAP photographie l'Univers au berceau

Le satellite américain a achevé au début de l'année une première cartographie complète du rayonnement cosmologique. Cette carte, qui succède à celle de Cobe, était très attendue des cosmologistes. Bien plus précise que celle de son glorieux aîné, elle devait permettre de faire le tri entre les différents modèles proposés çà et là. Et ils furent nombreux ces dix dernières années ! D'où la foule d'articles scientifiques parus peu après la publication des résultats de WMAP : plus d'une soixantaine en quelques mois !

Grâce à l'acuité de son regard micro-onde, le satellite américain vient en effet de dresser le portrait le plus détaillé jamais obtenu de l'Univers. Ainsi, dans leur interprétation orthodoxe, les données de WMAP révèlent que notre monde a précisément 13,7 milliards d'années, à 200 millions d'années près. Il se dilate à la vitesse de 72 km/s et par mégaparsec (cette constante de Hubble est mesurée avec une précision de 7). Sa densité totale est exactement égale à la densité critique -seuil au-delà duquel,

Pourtant, les cosmologistes sont ravis : « *WMAP consolide l'édifice !* » s'exclame ainsi François Boucher, de l'Institut d'astrophysique de Paris. « *On atteint un degré de précision qui permet de lever les ambiguïtés sur les modèles* », expliquait aussi Francis Bernardeau, du service de physique théorique du CEA, lors du récent congrès de la SF2A⁽⁴⁾. Et par-dessus tout, nous avons maintenant la confirmation que l'Univers a bien connu une brève phase d'expansion démesurée, baptisée "inflation". Au beau milieu de ce concert de "confirmations", un nombre inattendu est cependant venu semer le doute...

Les étoiles sont apparues très tôt

Ce nombre, c'est 17. Le redshift auquel, si l'on en croit les mesures de WMAP, l'Univers s'est "réionisé". Les astrophysiciens pensent en effet qu'au découplage entre matière et lumière, qui correspond à l'émission du fond diffus cosmologique, a succédé un âge sombre : en continuant à se refroidir, le cosmos est redevenu opaque. Puis les premières étoiles se sont allumées et ont finalement dissipé ces ténèbres.





Planck, désormais inutile ?

À l'annonce des résultats de WMAP, un léger frisson a parcouru la communauté astronomique européenne : à quoi donc sert Planck, désormais ? Le satellite de cartographie du fond diffus cosmologique, que le Vieux Continent doit lancer début 2007, sera certes dix fois plus sensible que son concurrent américain. Son regard sera aussi trois fois plus acéré. Pourtant, l'affaire semble entendue : WMAP a raflé la mise. À moins que... "Lorsque la mission européenne a été décidée, en 1996, le modèle cosmologique en vogue était très simple, rappelle Alain Riazuelo, chercheur au service de physique théorique du CEA. Les choses ont beaucoup changé depuis, et heureusement pour Planck : lui seul pourra tester les modèles, parfois exotiques, qui ont fleuri ces dernières années." La gamme de résolution angulaire de Planck, beaucoup plus étendue que celle de WMAP, est aussi un atout majeur : "Les paramètres cosmologiques publiés par l'équipe de WMAP ne proviennent pas uniquement des données du satellite, explique Simon Prunet, de l'Institut d'astrophysique de Paris. Il a fallu y ajouter les résultats d'autres expériences, de meilleure résolution mais qui n'ont observé qu'une petite portion du ciel." Résultat : des problèmes d'étalonnage, et donc des erreurs dans le calcul des fameux paramètres, sont à craindre. Planck, lui, observera à toutes les échelles... Enfin, la sensibilité du satellite dans les mesures de la polarisation du rayonnement cosmologique devrait permettre de dater précisément l'époque de la réionisation (lire article principal), encore trop floue au goût des astronomes.

Le satellite européen Planck doit être lancé début 2007. Composé d'un miroir d'1,5 m et de deux instruments fonctionnant entre 30 et 100 Ghz d'une part, et 100 et 850 Ghz de l'autre, il cartographiera le fond diffus avec une précision inégalée.

numériques et théoriques, explique ainsi Gilles Chabrier, du Centre de recherche astronomique de Lyon, mais nous devrions faire de gros progrès grâce au futur télescope spatial James Webb, dont l'un des objectifs est précisément d'observer ces premières étoiles. » Sont-elles aussi massives qu'on le pense ? Produisent-elles suffisamment d'éléments lourds ? Peuvent-elles se former assez rapidement pour s'accommoder des délais imposés par l'âge de l'Univers selon WMAP ? Questions cruciales pour la cosmologie et qui se résument en une seule : le successeur de Hubble sauvera-t-il le big bang ?

Cette époque de "réionisation" (c'est en s'ionisant sous l'effet du rayonnement ultraviolet des étoiles que l'Univers est devenu transparent) était jusque-là inconnue. WMAP la fixe à seulement 200 millions d'années après le big bang ! Ce qui peut sembler un peu court pour donner le temps à l'Univers de rassembler la matière et d'en faire des étoiles... Peut-on croire en cette datation sachant qu'elle repose sur des mesures de polarisation électromagnétiques du rayonnement cosmologique, un signal dix fois plus faible que les fluctuations du fond diffus ? Il semble bien que oui, car malgré les incertitudes — WMAP donne $z = 17 \pm 5$ — elle est en accord avec la présence de galaxies et de quasars à très haut redshift, ainsi qu'avec leur composition chimique.

Non seulement nous avons la preuve que ces objets s'étaient déjà formés moins d'un milliard d'années après le big bang, mais nous savons désormais que, dès cette époque, ils étaient considérablement enrichis en éléments lourds — carbone, oxygène, azote, silicium, magnésium, fer, etc. — synthétisés par les étoiles. Pour preuve, la découverte récente du fer dans un quasar très lointain par XMM (voir C&E n°398, p. 34), du magnésium dans trois autres par le télescope spatial, ainsi que de grandes quantités de poussières dans trois quasars parmi les plus reculés de l'Univers (une observation du radiotélescope de 30 m de l'Iram). Ces résultats, tout comme l'existence même des quasars si tôt dans l'Univers (ces objets extrêmement brillants abritent tout de même des trous noirs de plusieurs milliards de masses solaires, eux-mêmes formés à partir d'étoiles mortes), concordent avec ceux de WMAP : les premières étoiles doivent être nées 100 à 200 millions d'années seulement après le big bang...

Les premières étoiles au secours du big bang

Le problème, c'est que personne ne sait comment ! Le modèle cosmologique actuel, en plus de s'accommoder de 96 d'inconnu, conduit ainsi à une impasse. En apparence du moins, car les astrophysiciens n'ont pas dit leur dernier mot.

"Simuler la formation des premières étoiles pose des problèmes

(1) Lire Ciel & Espace n°395. avril 2003, p. 18. (2) Cosmic Background Explorer. (3) Boomerang, Maxima, Dasi, VSA, Archéops, Acbar, CBI... (4) Société française d'astronomie et d'astrophysique. Son congrès annuel s'est tenu à Bordeaux du 16 au 20 juin 2003.

